

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

トンネル工事における掘削前調査への
時間領域電磁探査法の有効性に関する研究

Study on effectiveness of Time Domain Electro-
Magnetic methods for the preliminary survey
on tunnel excavation

申 請 者

原	敏昭
Toshiaki	HARA

地球・環境資源理工学専攻 地圏環境学研究

2018 年 11 月

社会基盤の整備を目的として、各地でトンネルの建設が進められている。近年は新幹線や高速道路を用途とする長大トンネルの建設も多く、地質的に施工が困難な工事が増えている。トンネル掘削前の調査としては、文献調査、地表地質踏査、屈折法弾性波探査、ボーリング調査等が実施され、それらの結果に基づき支保設計が行われている。とくに施工前に実施される屈折法弾性波探査による地山弾性波速度は、岩盤の力学的性状をよく捉えており、トンネル地山分類の重要な要素として支保設計に反映される。しかし、大土被り、断層、逆転層(上層が硬質岩盤、下層が軟質岩盤)、膨潤性地山、帯水層等は屈折法弾性波探査では捉えにくい。そのため、トンネル掘削時に切羽の崩落や突発湧水が発生し、安全面や経済面に大きな問題を生じる。そこで、トンネル掘削前調査に電気・電磁探査を適用し、得られた比抵抗構造と他の地盤調査データを比較・検討することにより、地質構造や地下水の状況等の把握が試みられている。

申請者は、多くの資料や室内試験に基づいて、「岩石の比抵抗値は一軸圧縮強度や弾性波速度等の力学的性質と相関があること」、「粘土鉱物を多く含む岩石では低比抵抗を示すこと」、「岩石の割れ目が比抵抗に影響を及ぼすこと」等を明らかにした。しかし、原位置試験で得た岩盤の比抵抗値に影響を与える因子は多く、いずれの因子が測定値に反映しているかの解明は進んでいない。

本研究は、地下深部資源探査技術として発達してきた「時間領域電磁探査法」(以下、「TDEM 法」Time Domain Electro-magnetic Methods と記す)を、トンネル掘削前調査に適用し、前述の問題を解決することに焦点をあてたものである。なお、この探査は、従来、地下数百～数千 m における鉱山・地熱開発で利用されてきた技術であり、地下数 m～300m 程度のごく浅部の探査への適用例はわずかであった。

内容の概略は以下のとおりである。

- (1)TDEM 法の掘削前調査としての有効性の検討: 25 トンネルで掘削開始前に実施した TDEM 法による探査結果とトンネル掘削結果とを比較
- (2)断層、逆転層、150m を超える大土被りなど複雑な地質に対する TDEM 法の有効性の検討
- (3)膨潤性地山における現地探査及び数値シミュレーションによる TDEM 法の探査感度の検討
- (4)トンネル掘削前調査における TDEM 法の高精度化の検討

本論文は、6 章から構成されている。

第 1 章では、研究背景、研究の意義及び目的について記述した。

第 2 章では、従来のトンネルで使われていた物理探査について説明した後、TDEM 法の基礎的事項についてまとめた。最初にトンネルの掘削前調査として行われている物理探査を挙げ、その特徴について記述した。従来の掘削前調査では、屈折法弾性波探査が汎用されているが、適用困難な地質条件が数多く存在する。その解決策として従来行われてきたはぎとり法の解析に代わり、トモグラフィを

用いた解析法が主流となりつつある。しかし、トモグラフィを用いた解析の場合でも、土被りの厚さ以上のボーリング掘削が必要となり、とくに山岳地では効率面や経済面で問題となる。また、性状の異なる地質境界において弾性波速度に大きな違いがみられない場合も多い。このような状況を補うために、電気・電磁探査法をトンネル地山調査に適用する事例が多くなっている。しかし、通常の電気・電磁探査法は、150mを超える大土被りには適用できないことや、スタティックシフト現象(表層付近の不均質な比抵抗構造の影響により、地下深部の測定結果に誤差を生じること)やニアフィールド効果(送受信間隔が小さいときに、低周波数で見かけ比抵抗が増加する現象)等の問題点があり、探査深度・精度に限界があったことから、TDEM法の利用を試みた。本章の最後に、この方法の原理、探査方法、解析方法、特徴を記述した。

第3章では、トンネル掘削前調査におけるTDEM法の有効性について記述した。掘削開始前の25本のトンネルに測線を設け、TDEM法により比抵抗値を、屈折法弾性波探査により弾性波速度を測定した。得られた比抵抗値及び弾性波速度と、トンネル掘削結果から得た切羽評価点・切羽観察項目とを比較するために、数量化理論I類を用いて統計分析した。これらの結果から、TDEM法と屈折法弾性波探査の両者ともトンネル掘削前調査として十分有効であることを確認した。また、比抵抗値は割れ目の間隔、弾性波速度は一軸圧縮強度と強く関連していることが判明した。さらに同一現場において実施したTDEM法、屈折法弾性波探査及び二次元比抵抗探査の結果と、トンネル掘削時の地質調査結果を対比した。その結果、TDEM法は土被りが150mを超えても高い精度を維持する一方、屈折法弾性波探査と二次元比抵抗探査は土被りが150mを超えると探査精度が低下した。

第4章では、屈折法弾性波探査では解明できない逆転層、断層、大土被りや膨潤性地山といった地質状態とTDEM探査結果の関係について記述した。その概要を以下に列記する。

- (1)逆転層が分布する複数のトンネルでの探査結果から、TDEM法が逆転層の解明において有効な方法であることが判明した。
- (2)断層の探査では、断層が多数分布するトンネルで、有効な断層探査方法を検討した。探査はループ・ループ配置を用い、解析は比抵抗変化率に着目した。また、活断層である跡津川断層における調査では、3成分磁場応答を捉えることにより断層面を抽出できた。
- (3)土被りの違いによるTDEM法と屈折法弾性波探査の精度の差を検討した。その結果、TDEM法は200mを超える土被りにも対応できるが、屈折法弾性波探査は150mが限界であることが判明した。
- (4)トンネル掘削時及び完成後にも問題となる膨潤性地山での探査について検討した。膨潤性地山の指標である陽イオン交換容量(CEC)が大きな泥岩は、低比抵抗値を示す。そこで、CECの高い膨潤性泥岩分布地域でTDEM法による探査を行

い、本方法により膨潤性粘土鉱物を含む泥岩層の判別が可能であることを示した。さらに、現場での探査データの精度を検証するため、数値シミュレーションを用いて極めて低い比抵抗を示す地層に対する TDEM 法の分解能を検討した。その結果、膨潤性地山を低比抵抗層として検出できること、さらに低比抵抗層内に挟在する高い膨潤性を有する極めて低い比抵抗層を、感度良く識別できることを明らかにした。

第 5 章では、トンネル掘削前調査を高精度化するための方策についてまとめた。

トンネル切羽前方に空洞が存在すると突発湧水の原因となるばかりでなく、礫や粘土等が堆積して弱層部となり崩落の原因となる。しかし、これまでの技術では、このような空洞を探すことは困難であった。本研究では、栃木県大谷石掘削跡の大規模空洞で、TDEM 法を空洞探査へ適用する実験を行った。その結果、探査法・解析法を改良することにより掘削跡である空洞を検出できることが判明した。さらに、この手法を用いて離島の地下ダム建設予定地の 2 か所で、石灰岩中の自然空洞を検出できることを示した。

また、TDEM 法によるトンネル坑内での切羽前方探査における TDEM 法の有効性を検討した。有限差分法を用いた 3 次元モデル計算を行い、地山と破碎帯の比抵抗コントラスト・破碎帯までの距離・磁気センサの位置等により、磁場の過渡現象曲線がどのように変化するかを定量的に示した。この結果に基づき、実際に掘削終了後の坑内に送信用ループを敷設し、既知の断層破碎帯近傍で渦電流を測定したところ、透過速度低下が見られ、切羽前方探査に対して適用可能であることが判明した。

第 6 章は、本研究で得られた成果をまとめた。

TDEM 法を 25 本のトンネル掘削前調査に適用し、得られた比抵抗値をトンネル掘削結果と比較し統計分析した。TDEM 法で得られた比抵抗値は、弾性波速度と同等にトンネル掘削前調査として十分有効であること、またトンネル切羽岩盤内に存在する割れ目の間隔に最も影響を受けていることが明らかとなった。屈折法弾性波探査で解明の難しかった逆転層、断層破碎帯、150m を超える土被りに対しては、探査法・解析法の検討および数多くの探査結果を比較することにより、TDEM 法により有効な情報が得られることを明らかとした。とくに、弾性波速度に違いが無くても、膨潤性地山の判別が可能であり、さらに数値シミュレーションによる検討から、その探査感度の良いことが実証できた。

これらの結果により、TDEM 法により得た比抵抗値は、トンネル掘削岩盤の性状をよく反映しており、屈折法弾性波探査では解明の難しかった地質構造に対しても有効であることが明らかとなった。さらに空洞やトンネル坑内からの切羽前方に対する探査へ利用できることが示された。

以上より、TDEM 法がトンネル掘削前調査として有効であることが明らかとなり、今後の工事の安全面や効率面への貢献が期待される。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 原 敏昭 印

(2019 年 7 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
筆頭論文 (筆頭, 査読あり)	<p>○大土被り及び膨潤性地山トンネル調査に対する時間領域電磁探査法の適用, 物理探査 (2018.3 投稿, 2019.6 受理 掲載決定), 原敏昭・磯真一郎・斎藤章</p> <p>○Applicability of the Time Domain Electro-Magnetic methods to investigation of ground classification along tunnel routes, International Journal of the JSRM, 2018.7, 1-8, <u>Toshiaki Hara, Shinichiro Iso and Akira Saito</u></p> <p>○TDEM 法のトンネル調査への展開, 応用地質 Vol.38, No.6, 337-348, 1998, 原敏昭・西牧均・斎藤章・和田一成</p> <p>○Application of Time Doman EM Survey in Civil Engineering, ISRM 8th Congress, Vol.1, 85-88, 1995.9, <u>Toshiaki Hara</u> and Akira Saito</p>
講演論文 (筆頭, 査読あり)	<p>○Development of Rock Fracturing method and Application of EG-Slitter Method to the Tunnel, International Tunnelling Association 33rd Congress, 258-262, 2007.9, <u>Toshiaki Hara</u>, Mitsumasa Okamura, Tetsu Kimura and Kouji Ishiyama</p> <p>○トンネル調査での比抵抗値の適用性, 第 10 回岩の力学シンポジウム講演論文集, 473-478, 1998.4, 原敏昭・西牧均・斎藤章・和田一成</p> <p>○TDEM 電磁探査法の土木分野への適用, 第 9 回岩の力学シンポジウム講演論文集 349-354, 1994.9, 原敏昭・岡村光政・請川誠・斎藤章・和田一成・石川秀浩</p>
共著論文 (査読あり)	<p>○土かぶり 300m での電磁探査 東北新幹線金田一トンネル南工区, トンネルと地下, Vol.32, No.9, 7-13, 2001.9, 佐伯則幸・佐々木照夫・小林由委・原敏昭</p> <p>○Sequential application of several survey systems in tunneling for ground classification, IS-Kyoto 2001, Modern Tunneling Science and Technology, Vol.1, 269-272, 2001.10, Mitsumasa Okamura, <u>Toshiaki Hara</u>, Tetsu Kimura, Kouji Ishiyama and Toru Hirano</p> <p>○Fast Imaging of TDEM data based on S-Inversion, JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS 43, 15-32, 2000, Efthimios Tartaras, Michael S.Zhdanov, Kazushige Wada, Akira Saito and <u>Toshiaki Hara</u></p> <p>○岩石の比抵抗に対する割れ目と挟在物の影響, 応用地質 Vol.38, No.4, 213-223, 1998, 関根一郎・西牧均・石垣和明・原敏昭・斎藤章</p> <p>○岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係, 土木学会論文集 No541, III-35, 75-86, 1996.9, 関根一郎・西牧均・石垣和明・原敏昭・斎藤章</p> <p>○岩石の比抵抗における表面伝導の影響とそれを考慮した比抵抗と弾性波速度との関係について, 土木学会論文集, No568, III-39, 209-219, 1997.6, 関根一郎・西牧均・石垣和明・原敏昭・斎藤章</p> <p>○An Approach to Fracture Prediction from Tunnel Face by Transient Electromagnetic Method, ISRM Symposium, NYRocks'97, Columbia University, New York, U.S.A., 75-82, 1997.5 Kazushige Wada, Tadashi Tsutsui, Akira Saito, Takashi Ohya and <u>Toshiaki Hara</u></p> <p>単孔多段式地下水圧測定システムの実用化, 応用地質 Vol.36, No.3, 188-202, 1995, 山口嘉一・檜垣大助・原敏昭・梅田美彦・中尾誠司・後藤年芳・杉村亮二</p>

○：博士論文と密接に関係する内容である。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演論文 （筆頭，査読なし）	<p>○トンネル切羽崩落部での改良とその確認方法，土木学会第 70 回年次学術講演会講演論文集VI-763, 1525-1526, 2015, <u>原敏昭</u>・杉内仁志・西脇明彦・香川直輝・斎藤章・中山圭子</p> <p>○低土被り部での事前地山調査と補助工法，土木学会第 69 回年次学術講演会講演論文集VI-0039, 77-78, 2014, <u>原敏昭</u>・杉内仁志・西脇明彦・香川直輝</p> <p>○穿孔探査システムでのフィード圧補正，土木学会第 58 回年次学術講演会講演論文集III-158, 315-316, 2003, <u>原敏昭</u>・熊谷成之・石垣和明・木村哲・平野亨・山下雅之</p> <p>○山岳トンネルにおける切羽前方探査の高精度化の試み，第 12 回トンネル工学研究発表会講演集 189-194, 2002, <u>原敏昭</u>・熊谷成之・木村哲・平野亨</p> <p>○高精度切羽前方探査システムの構築，土木学会第 57 回年次学術講演会講演論文集III-665, 1329-1330, 2002, <u>原敏昭</u>・熊谷成之・木村哲・石山宏二・平野亨</p> <p>○高精度切羽前方探査システムの提案，土木学会第 56 回年次学術講演会講演論文集III-A287, 574-575, 2001, <u>原敏昭</u>・岡村光政・木村哲・石山宏二・山下雅之</p> <p>○高比抵抗地域における TDEM 法の適用性の検討，土木学会第 55 回年次学術講演会講演論文集III-A296, 592-593, 2000, <u>原敏昭</u>・桑原洋・岡村光政・西牧均・志関彰男</p> <p>○TDEM 法を用いた断層調査，土木学会第 54 回年次学術講演会講演論文集III-A357, 714-715, 1999, <u>原敏昭</u>・岡村光政・西牧均</p> <p>○TDEM 法の大規模空洞調査への適用，土木学会第 53 回年次学術講演会講演論文集III-A404, 804-805, 1998, <u>原敏昭</u>・西牧均・和田一成・斎藤章</p> <p>○TDEM 法によるトンネル調査(その 4)，土木学会第 52 回年次学術講演会講演論文集III-A328, 656-657, 1997, <u>原敏昭</u>・西牧均・関根一郎・斎藤章・和田一成</p> <p>○TDEM 法によるトンネル調査(その 3)，土木学会第 51 回年次学術講演会講演論文集III-A, 738-739 1996, <u>原敏昭</u>・西牧均・関根一郎・和田一成・斎藤章</p> <p>○TDEM 電磁探査法によるトンネル調査，第 27 回岩盤力学シンポジウム講演論文集 396-400, 1996, <u>原敏昭</u>・西牧均・関根一郎・斎藤章・和田一成</p> <p>○TDEM 法によるトンネル調査(その 2)，土木学会第 50 回年次学術講演会講演論文集III.98-99, 1995, <u>原敏昭</u>・岡村光政・西牧均・斎藤章・和田一成</p> <p>○TDEM 電磁探査法の土木分野への適用(その 2)，第 26 回岩盤力学シンポジウム講演論文集 514-517, 1995, <u>原敏昭</u>・西牧均・関根一郎・斎藤章・和田一成</p> <p>○TDEM 法による山岳トンネル調査のための基礎的検討，第 5 回トンネル工学研究発表会講演集 369-372, 1995, <u>原敏昭</u>・和田一成・斎藤章・関根一郎・西牧均</p> <p>○TDEM 電磁探査法によるトンネル調査，土木学会第 49 回年次学術講演会講演論文集III.1836-1837, 1994, <u>原敏昭</u>・岡村光政・西牧均・斎藤章・和田一成</p>

○：博士論文と密接に関係する内容である。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演論文 （共著，査読なし）	<p>○TEM 法によるトンネル前方探査，トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム講演会講演論文集，93-100, 2000.5, 和田一成・<u>原敏昭</u>・斎藤章</p> <p>○TEM 法データの電磁マイグレーションによる空洞検出の試み，物理探査学会第 96 回学術講演会講演論文集Ⅲ，196-199, 1998, 志賀信彦・和田一成・筒井直・<u>原敏昭</u></p> <p>○3次元モデル計算による TEM 法のトンネル前方探査への適用性の検討，物理探査学会第 95 回学術講演会講演論文集，297-301, 1997, 和田一成・筒井直・斎藤章・<u>原敏昭</u>・Michael Zhdnov</p> <p>○TDEM 電磁探査のトンネル調査への適用(その3)，物理探査学会第 91 回学術講演会講演論文集，157-161, 1993, 斎藤光義・和田一成・奥住宏一・<u>原敏昭</u>・関根一郎</p> <p>○TDEM 電磁探査のトンネル調査への適用(その2)，物理探査学会第 90 回学術講演会，講演論文集，364-368, 1992, 和田一成・斎藤章・石川秀浩・<u>原敏昭</u>・岡村光政</p> <p>○TDEM 電磁探査のトンネル調査への適用，物理探査学会第 89 回学術講演会講演論文集，276-279, 1991, 石川秀浩・和田一成・斎藤章・大屋峻・岡村光政・<u>原敏昭</u>・請川誠</p>
特 許	<p>○特許第 3204927 号「地下電磁探査方法及び電磁探査システム」公開日 1996.5.21, 審査請求日 1999.1.27, 西牧均・<u>原敏昭</u></p> <p>○特許第 3130442 号「トンネル切羽前方の地下電磁探査方法及び装置」公開日 1996.9.3, 審査請求日 1999.1.27, 西牧均・<u>原敏昭</u></p> <p>○特許第 3130418 号「地下電磁探査方法および装置」公開日 1995.4.25, 審査請求日 1999.1.27, 岡村光政・<u>原敏昭</u>・請川誠</p> <p>○特許第 3204910 号「地下電磁探査方法」公開日 1996.5.21, 審査請求日 1999.1.27, 西牧均・<u>原敏昭</u></p> <p>○特許第 3236478 号「地下電磁探査装置」公開日 1997.1.10, 審査請求日 1999.1.27, 西牧均・<u>原敏昭</u></p> <p>○特許第 3236455 号「地下電磁探査方法および装置」公開日 1996.5.21, 審査請求日 1999.1.27, 岡村光政・<u>原敏昭</u></p> <p>特許第 4689582 号「長尺削孔装置」公開日 2008.6.5, 審査請求日 2009.9.25, 石山宏二・山下雅之・木村哲・岡村光政・<u>原敏昭</u>・塚田純一</p> <p>特許第 4649650 号「遮音構造体」公開日 2002.5.14, 審査請求日 2007.10.24, 高橋稔, 松本健太郎・浅見健一郎・宮地守・岡村光政・内藤将史・<u>原敏昭</u>・山本雅昭・佐藤俊一</p> <p>特許第 4410622 号「岩盤削孔装置」公開日 2006.1.19, 審査請求日 2007.6.5, 木村哲・石山宏二・平野享・山下雅之・熊谷成之・<u>原敏昭</u>・塚田純一</p>
表 彰	<p>○平成 4 年度ダム工学研究会技術開発賞 『単孔多段式地下水圧測定システム(MGL システム)の開発』 山口嘉一・檜垣大助・<u>原敏昭</u>・梅田美彦・中尾誠司・後藤年芳・杉村亮二</p>

○：博士論文と密接に関係する内容である。